

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geochemie, nerostných a přírodních zdrojů



Radon a lidské tělo
Model stanovení dávek při aplikaci radonu

Radon and the human body
Modeling radiation dose within the radon treatment

Bakalářská práce

Jan Šimon

Vedoucí: Mgr. Viktor Goliáš Ph.D.

Praha, květen 2009

Abstrakt

Radon, radioaktivní prvek patřící mezi vzácné plyny, je nedílnou součástí přirozeného prostředí. Má prokazatelný vliv na lidský organismus. Jeho pozitivních účinků je využíváno lázeňství, zvláště při nemocech pohybového aparátu. Radon se aplikuje inhalací, koupelemi, či ingescí (konzumací). Po těchto procedurách lze stanovit radiační dávku.

Klíčová slova: radioaktivita, radon, radonové riziko, radiační hormeze, balneologie, dozimetrie, stanovení dávek

Summary

Radon is radioactive element. It belongs to inert gasses and it is integral part of natural environment. It has detectable influence on human health. Its positive effects are used in radon balneology. Radon is applicated by inhalation, radon bathing and ingestion (consummation). After these procedures is possible to make dose calculation.

Keywords: radioactivity, radon, radon risk, radiation hormesis, balneology, dosimetry, dose calculation

Poděkování: vedoucímu bakalářské práce Mgr. Viktoru Goliášovi PhD. za dodání potřebných materiálů, za vedení práce a za možnost absolvování několika terénních akcí, které byly pro tuto práci velmi hodnotné.

OBSAH:

Úvod.....	4
1. Radioaktivita a radon.....	5
1.1 Radioaktivita.....	5
1.2 Druhy záření.....	5
1.3 Vlastnosti radonu	6
1.4 Jednotky aktivity radonu	7
2. Radioaktivita a lidské tělo.....	7
2.1 Stochastické účinky.....	8
2.2 Deterministické účinky.....	9
2.3 Lineární teorie.....	9
2.4 Radiační hormeze.....	11
2.5 Apoptóza.....	13
2.6 Biologický dopad na organismus při velkých dávkách.....	14
3. Radonová balneologie	15
3.1 Způsob aplikace radonové balneoterapie.....	16
3.1.1 <i>Radioaktivní koupele</i>	16
3.1.2 <i>Radonové inhalace</i>	16
3.1.3 <i>Pitná kúra</i>	16
3.2 Nemoci léčené radonem.....	16
3.3 Nejvýznamnější fyziologické reakce při radonové kúře.....	17
4. Model stanovení dávek při aplikaci radonu.....	18
4.1 Dozimetrické veličiny.....	18
4.2 Dávky při aplikaci.....	20
4.2.1 <i>Vzorce pro konzumaci</i>	20
4.2.2 <i>Vzorec pro inhalaci</i>	22
5. Diskuse.....	24
6. Závěr.....	24
Seznam použité literatury.....	25

Úvod

Naše společnost pohlíží na radioaktivitu jako na něco nepřirozeného, až mystického. Mohou za to události, které ovlivnily tok dějin v druhé polovině dvacátého století., svržení jaderné pumpy na Hirošimu, či exploze jaderného reaktoru v Černobylu. Tyto neblahé události odsoudily radioaktivitu v myslích lidí na dlouhá léta. Například ve srovnání s cigaretami je radioaktivita velice milosrdný fenomén. Nejenže na ni masově lidé neumírají, dokonce dokáže být prospěšná. Aplikováním malých dávek radonu pomáhá, přitom riziko je minimální a účinek je prokazatelný. Proto je škoda, že toto ryze přírodní léčebné médium je víceméně opomíjeno.

1. Radioaktivita a radon

1.1 Radioaktivita

Radioaktivita neboli radioaktivní rozpad je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká radioaktivní záření. Změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku. Radioaktivní záření objevil v roce 1896 Henri Becquerel u solí uranu. K objasnění podstaty radioaktivity zásadním způsobem přispěli francouzští fyzikové Pierre Curie a Marie Curie-Sklodovská. Radioaktivita se běžně rozděluje na radioaktivitu přirozenou a umělou. Přirozená radioaktivita je důsledkem samovolného rozpadu atomového jádra.

V přírodě je možné pozorovat mnoho radioaktivních prvků, které se do okolí uvolňují z hornin, jež obsahují radioaktivní minerály. Umělou radioaktivitu získají prvky transmutací, vlivem řetězové reakce nebo působením urychlených částic. U umělé radioaktivity je tedy přeměna jádra způsobena vnějším vlivem, např. ostřelováním částicemi α se jádra mohou dále samovolně rozpadat, tzn. stanou se radioaktivními. (upraveno dle www.wikipedia.cz)

Poločas rozpadu T je doba, za kterou dojde k rozpadu poloviny z původního počtu atomů radionuklidu. Počet částic po uplynutí této

doby je $n = \frac{n_0}{2}$, čímž dostaneme pro poločas rozpadu vztah

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx 0,693 \cdot \lambda^{-1}$$

1.2 Druhy radioaktivního záření

Záření, které vzniká při radioaktivním rozpadu, je čtyř druhů. Označujeme je jako α , β , γ a neutronové záření.

Záření α je proud jader helia (α -částic) a nese kladný elektrický náboj, má nejkratší dosah (lze ho zastavit např. i listem papíru).

Záření β je proud záporně nabitých elektronů. Někdy se rozlišuje záření β^- (elektrony) a β^+ (kladně nabitě pozitrony), lze ho zachytit 1 cm silným plexisklem, nebo deskou olova silnou 1 mm.

Záření γ je elektromagnetické záření vysoké frekvence neboli proud velmi energetických fotonů. Nemá elektrický náboj, a proto nereaguje na elektrické pole.

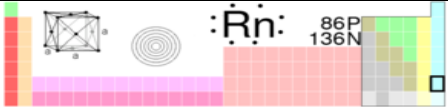
Neutronové záření je proud neutronů. Nemá elektrický náboj. (www.wikipedia.cz)

1.3 Vlastnosti radonu

Chemická značka je Rn, lat. Radonum. Radon je nejtěžším prvkem ve skupině vzácných plynů, je radioaktivní a nemá žádný stabilní izotop. Jedná se o bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu, který je nereaktivní. Vzniká jako produkt radioaktivního rozpadu radia a uranu a díky své nestálosti postupně zaniká dalším radioaktivním rozpadem. Je známo přibližně dvacet nestabilních izotopů radonu. Chemické sloučeniny tvoří stejně jako krypton a xenon pouze vzácně s fluorem, chlorem a kyslíkem, všechny jsou velmi nestálé a jsou mimořádně silnými oxidačními činidly. Radon je velmi dobře rozpustný ve vodě (okolo 51 % svého objemu) což zapříčiňuje vznik radioaktivních minerálních vod. Ještě lépe se rozpouští v nepolárních organických rozpouštědlech. Radon byl objeven roku 1900 Friedrichem Ernestem Dornem při zkoumání radioaktivního rozpadu radia a pojmenoval ho radiová emanace. William Ramsay charakterizoval radiovou emanci jejím spektrem roku 1910, určil její hustotu a z ní i atomovou hmotnost a navrhl pro ni název svítící - nitron Nt. Později se jméno prvku ještě několikrát změnilo, až byl nakonec přijat návrh na jméno radon a toto označení se používá od roku 1923.

Radon se získává tak, že se roztok radnaté soli nechá stát asi čtyři týdny v uzavřené láhvi. Za tuto dobu se ustanoví rovnováha s radiem a jeho emanací. Radon se poté dá oddestilovat nebo vyvařit. V přírodě se radon vyskytuje v radioaktivních vodách, které vznikají kontaktem s radioaktivním geologickým podložím.

Tabulka. 1 fyzikální vlastnosti radonu (www. Wikipedia.cz)

Radon	
	
Chemická značka	Rn (lat. <i>radonum</i>)
Atomové číslo	86
Izotopy	208, 209, 210, 211, 212, 219, 220, 221, 222 , 223, 224
Relativní atomová hmotnost	222
Elektronová konfigurace	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
Skupenství	Plynné
Teplota tání	-71 °C (202 K)
Teplota varu	-65 °C (208 K)
Hustota	9,73 g/cm ³ (0 °C, 101,325 kPa)
Ve vzduchu	10 ⁻¹⁷ %
Skupenské teplo varu při -62 °C	17,985 kJ/mol
Skupenské teplo tání při -71 °C	3,346 kJ/mol
Kritická teplota	+104,5 °C
Kritický tlak	62,4 atm
Kritická hustota	1,2

1.4 Jednotky aktivity radonu

První jednotka aktivity byla Macheova jednotka (M.J). Tato jednotka se často vyskytovala v německé literatuře. V anglické literatuře se častěji vyskytuje jednotka Curie. Jednotka Curie (Ci) byla představena v roce 1910.

Používají se však další mnohé jednotky, nejčastěji Stat (St), jednotka emanace (Eman). Podle SI systému se užívá Bq/l pro vodu, což znamená počet rozpadů za jednu sekundu v jednom litru a Bq/m³ pro vzduch, což je počet rozpadů v jednom m³ vzduchu za sekundu.

Přepočty:

$$1\text{M.J.} = 364 \text{ pCi/l}$$

$$1\text{M.J.} = 1 \text{ mSt/l}$$

$$1\text{M.J.} = 3,64 \text{ Eman}$$

$$1\text{M.J.} = 13,5 \text{ Bq/l}$$

$$1\text{Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1\text{Bq} = 27 \text{ pCi}$$

(Becker 2004)

2. Radioaktivita a lidské tělo

Vliv radioaktivity na lidský organismus je závislý na délce expozice, typu a síly záření a také na odolnosti organismu. Na vliv radioaktivity na lidský organismus panují dva protichůdné názory. První skupina vědců jakoukoliv radioaktivitu až úzkostlivě odmítá a propaguje názor,

že kontakt člověka s jakoukoliv dávkou radiace je škodlivý. Argumentuje přitom tím, že při kontaktu jaderné částice s organismem dochází k nevratnému poškození jeho DNA, takže vzniká riziko zhoubného bujení, nekontrolovatelného množení buněk. Druhá skupina vědců se přiklání k názoru, že radioaktivita je do jisté míry prospěšná. Díky adaptačním mechanismům; po celou genesi lidstva a ostatních organismů zde byla radioaktivita součástí přirozeného prostředí, navíc v historii lze předpokládat mnohem větší dávky přirozené radioaktivity. Co se týče poškození DNA při kontaktu s radioaktivními částicemi, tak dochází při malých dávkách ke spuštění opravných mechanismů, takže škodlivost malých dávek zde není v tomto smyslu průkazná. Naopak lze hovořit o dějích prospěšných.

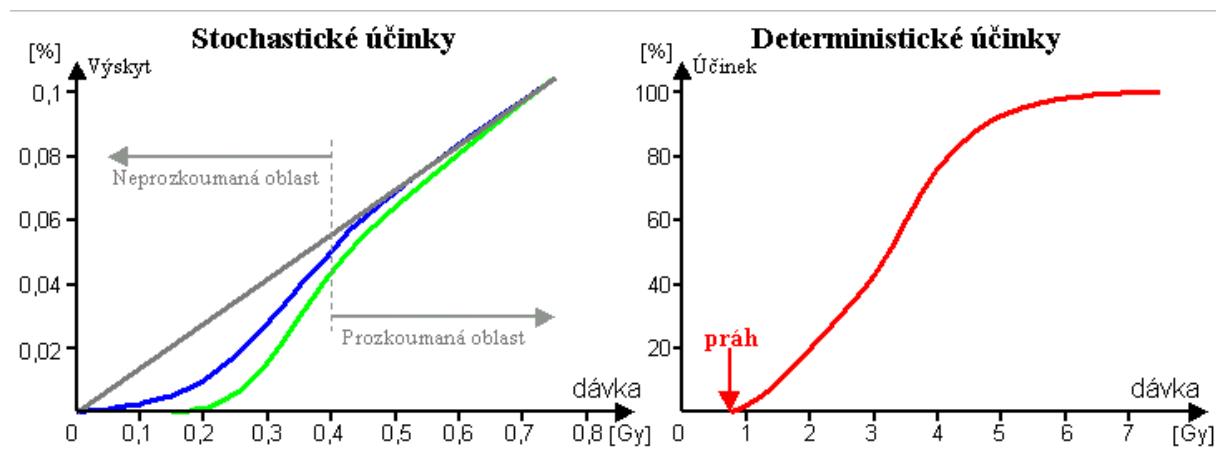
Malé dávky jsou totiž zcela přirozené a jsou lepší nežli dávky nulové, které se v přírodě prakticky nevyskytují. U mírně zvýšených dávek lze sledovat prospěšný léčivý efekt, který se využívá v lázeňské balneologii. Když však přísun dávek vzroste nad určitou hranici, která závisí na mnoha faktorech, potom reparační mechanismy nestíhají opravovat poškozené buňky, pozitivní vliv klesá a roste vliv negativní. U extrémně vysokých dávek roste mortalita.

2.1 Stochastické účinky

Pokud dávka záření není velká, s naprostou většinou poškození biologicky aktivních látek se organismus úspěšně vyrovná svými reparačními mechanismy. I při malých dávkách však existuje určitá pravděpodobnost, že některá poškození se opravit nepodaří (resp. při opravě dojde k "chybě"), mutované buňky se dále dělí a vzniknou pozdní trvalé následky genetického nebo nádorového charakteru. Jelikož takové následky jsou zcela náhodné, individuální a nepředvídatelné, nazývají se účinky stochastické. Mají pravděpodobnostní charakter. U jedinců z ozářeného souboru osob se poškození či onemocnění vyskytují náhodně s určitou pravděpodobností, která roste s dávkou. Tato teorie je ovšem těžko prokazatelná, protože u nemocných osob, kde došlo k zhoubnému bujení, nelze vyloučit jiný vliv, jako třeba kouření, či genetická dispozice. Tímto modelem se řídí lineární teorie. Novější radiobiologické studie však ukazují, že závislost stochastických účinků na dávce není lineární, ale že v oblasti velmi nízkých dávek jsou účinky nižší než by odpovídalo lineární závislosti, neexistuje žádný důkaz, že nízká úroveň záření je zdraví škodlivá. (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika) U stochastických účinků závažnost postižení a průběh vzniklého onemocnění nejsou závislé na výši dávky; na absorbované dávce závisí pouze pravděpodobnost výskytu nádorového či genetického poškození. Jde přitom o chorobné stavy, které i bez vlivu záření se "samovolně" (bez zjevné příčiny) vyskytují v populaci.

2.2 Deterministické účinky

Při vysokých dávkách záření je počet poškozených molekul biologicky aktivních látek již natolik vysoký, že organismus není schopen je zcela opravit – část buněk hyne, vzniká nemoc z ozáření. Poškození tkáně je zde přímo úměrné obdržené dávce záření, není již náhodné, je naopak předvídatelné – hovoříme o účincích deterministických. Deterministické účinky se projevují až po dosažení určité prahové dávky, přičemž s rostoucí dávkou roste jednak pravděpodobnost vzniku poškození (tj. při ozáření souboru osob roste počet jedinců, u nichž lze poškození prokázat), jednak u daného jedince se zvyšuje závažnost poškození. Závislost radiačního účinku na absorbované dávce pro deterministické účinky je znázorněna na obr.1 vpravo. (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika) Základním patogenním mechanismem je snížení počtu buněk v ozářené populaci. Esovitý tvar křivky, začínající od určitého dávkového prahu, je dokladem toho, že v ozařované tkáni (buněčné populaci) je určitá funkční rezerva, zpravidla dosti značná. Pokles počtu buněk se stoupající dávkou proto zpočátku nezpůsobuje v ozařované tkáni žádné funkční potíže, teprve při vyšších dávkách vede deficit buněk k somatickým projevům.

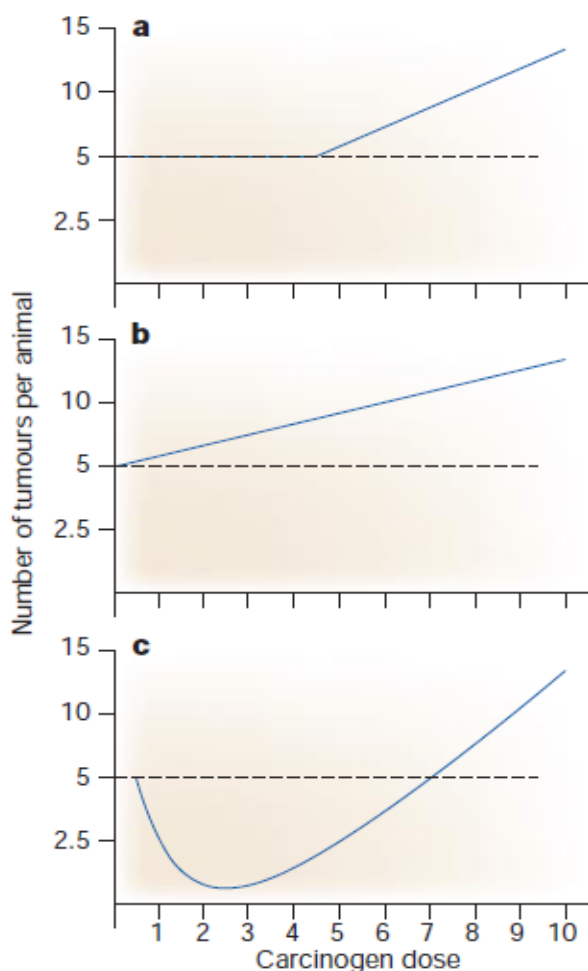


Obr.1 Stochastické účinky, Deterministické účinky (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)

2.3 Lineární teorie

Konzervativní tzv. bezprahová teorie uvažuje lineární závislost mezi negativním účinkem a dávkou záření, již od hodnot radiace blízkých nule. Bod $[0,0]$ je považován jako výchozí (nulová dávka = nulový účinek), proloží se přímkou od nuly do skutečně prokázaných hodnot a chybějící hodnoty v oblasti nejnižších dávek nahradí extrapolovanými hypotetickými hodnotami. A tímto vzniká tvrzení o škodlivých stochastických účincích u nejnižších dávek záření, neboli o bezprahovosti stochastických účinků. Tvrzení často opakované (a proto obecně přijímané), avšak neprokázané. (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)

Kromě lineární teorie se v literatuře často vyskytují další dva modely účinků radiace na organismy, které jsou interpretovány na obrázku 2. (Calabrese, Baldwin 2003)

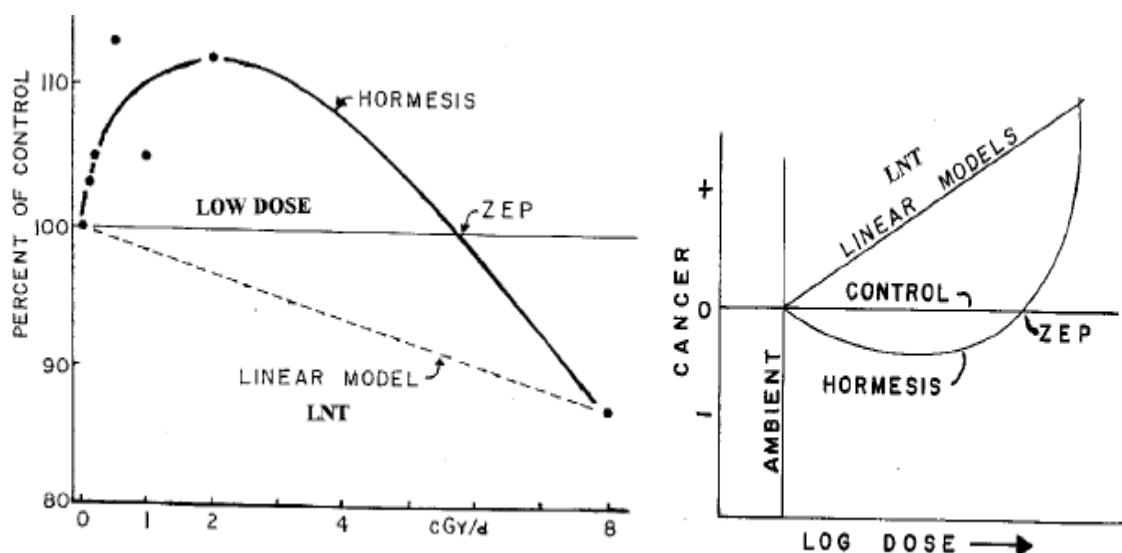


Obr.2 odlišné interpretace vlivů radiace na zdraví organismů (Calabrese, Baldwin (2003))

Na ose x je znázorněna dávka radioaktivity, na ose y je počet nádorových onemocnění u zvířat. První teorie (shora) nám vypovídá to, že malé dávky nepůsobí organismu žádné škody, je zde určitá míra tolerance a škodlivost je patrná až od vyšších dávek, ovšem o pozitivním vlivu se nezmiňuje. (deterministické účinky, výše)

Zde druhá, tzv. lineární teorie počítá s tím, že každá, i minimální dávka je škodlivá. (stochastické účinky) A podle třetí teorie se dozvíme o tzv. Hormezním efektu, zde se počítá s tím, že malé dávky organismu neškodí, naopak ho stimulují. Tohoto principu se využívá při lázeňské léčbě radioaktivními vodami.

Tyto samé poznatky o pozitivním vlivu malých dávek předpokládá práce Luckeyho (2000).



Obr 3. porovnání lineárního modelu (LNT) s modelem hormeze (Luckey, 2000)

2.4 Radiační hormeze

Tato teorie nám říká, že přiměřené množství poruch vyvolaných malou dávkou záření může v organismu iniciovat a stimulovat reparační mechanismy na úrovni chromozomů, které opraví nejen tyto radiační poruchy, ale přiberou i řadu dalších defektů vzniklých při metabolismu, které by jinak mohly zůstat neopraveny. Tato radiační hormeze, či adaptivní odezva na ozáření buněk a organismů, je jakási obdoba "imunizace" v organismu. Pozn.: Slovo *hormeze* pochází z řec. "*hormaein*" = "vybudit, excitovat". Podle těchto názorů by tedy malé dávky záření mohly být pro organismus prospěšné. Nízká dávka záření spustí "signál" vydávaný poškozenými DNA a následný reparační proces opraví veškeré nalezené chyby a odstraní ty nukleotidy, jež opravit nelze (teorie apoptózy). Je-li množství poškození způsobených zářením menší než je kapacita reparačního systému, opraví se i další chyby; po ozáření malou dávkou je v DNA méně chyb než před ním – dochází k pozitivnímu účinku. Při vyšší dávce, kdy rozsah radiačního poškození překročí reparační kapacitu, je již účinek ozáření negativní. Při radiační adaptivní odezvě se může uplatňovat několik mechanismů (www.sweb.cz/AstroNukIFyzika)

Časový - zpomalení buněčného cyklu, takže do začátku další mitózy se některá poškození stačí opravit;

Chemický - neutralizace a tím detoxikace reaktivních radikálů;

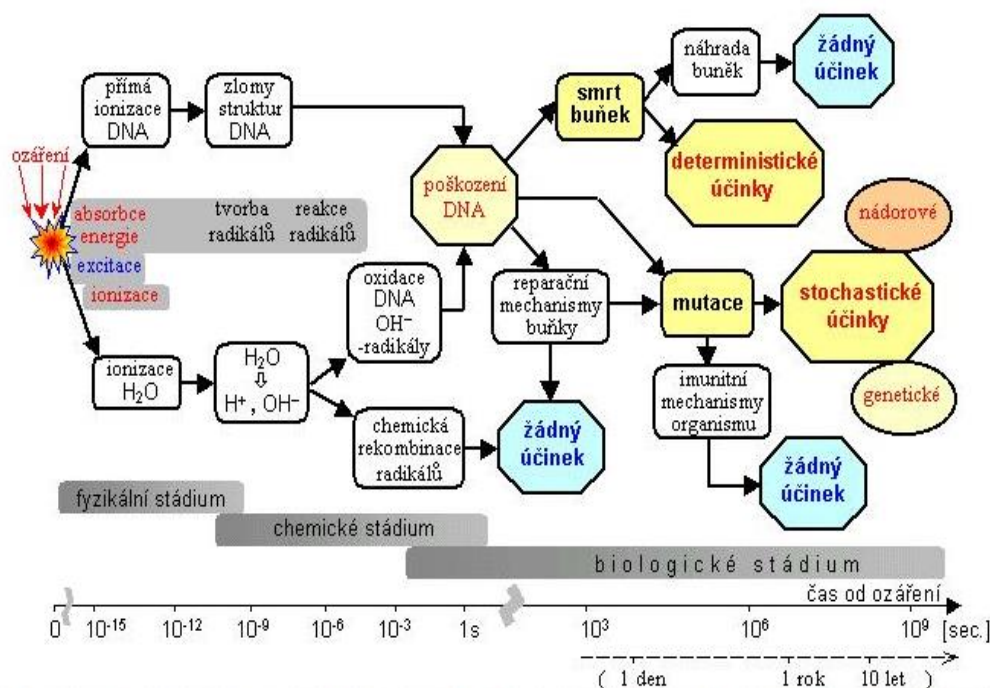
Biochemický - aktivace enzymů podílejících se na reparaci;

Imunitní - stimulace obranných mechanismů na úrovni celého organismu, které by mohly napomoci eliminaci buněk změněných nejen vlivem radiace.

Určitá malá "přípravná" či "preventivní" dávka záření může tak chránit buňky proti poškozením vyvolaným následnou mnohem vyšší dávkou. Malá dávka aktivuje v buňce enzymy určené k opravě genetické informace, díky čemuž se buňka snáze vypořádá s případnými následky silnějšího ozáření. Co se týče vlivu záření na složité mnohobuněčné organismy, vyskytuje se i názor, že malá dávka záření nebo některých toxinů zbavuje organismus buněk, které mají oslabené reparační mechanismy a u kterých by v budoucnu hrozilo, že propadnou zhoubnému bujení. Tyto (zatím) nekonformní názory byly ověřovány i experimentálně. Byly prováděny zajímavé experimenty na bakteriích. Kultura bakterií (.....) byla rozdělena na dvě části, z nichž jedna byla umístěna do dobře stíněného boxu, kde byla úroveň radiačního pozadí nižší než v přírodě. Druhá skupina bakterií byla za stejných ostatních podmínek (teplota, tlak, vlhkost, živiny) vystavena slabému poli ionizujícího záření. Byl zjištěn překvapivý výsledek: bakterie vystavené záření prosperovaly po všech stránkách poněkud lépe než bakterie z druhé skupiny stíněné před zářením. (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)

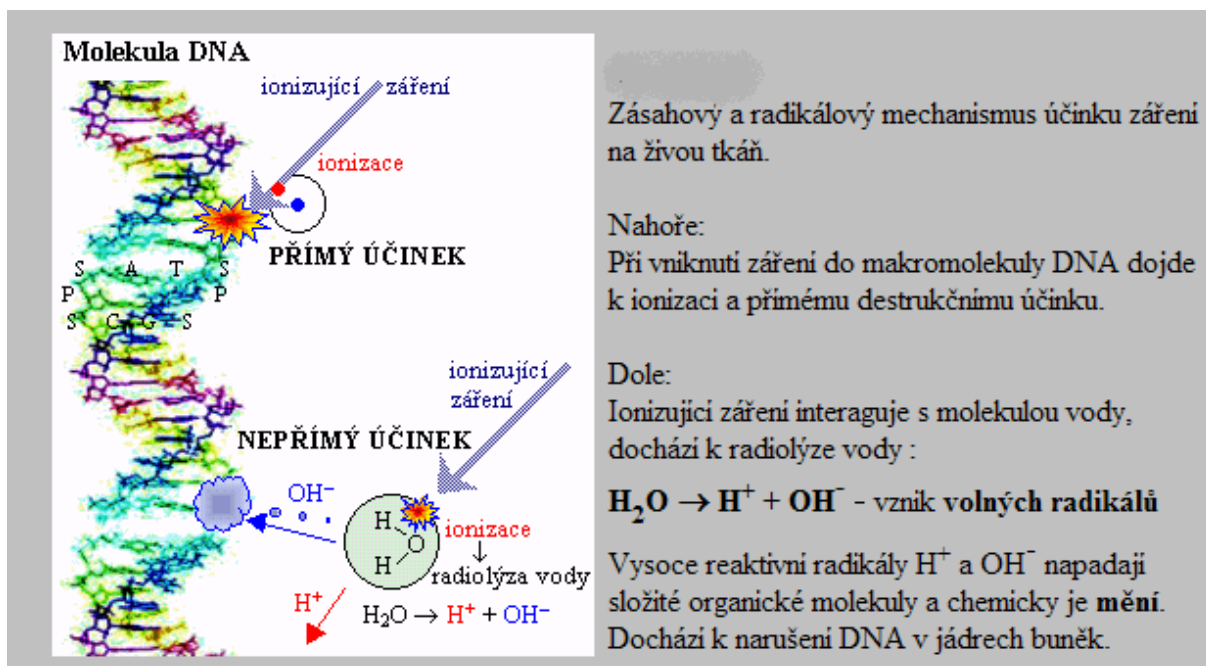
Na obrázku je popsán mechanismus dějů při ozáření s možnými následnými účinky.

(www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)



Schématické znázornění významných procesů a jejich časové posloupnosti při účincích ionizujícího záření na živou tkáň. Pozn.: Měřítko na časové ose je v zásadě logaritmické, avšak v některých úsecích je poněkud upraveno tak, aby bylo možno přehledně zakreslit jednotlivé děje.

Obr.4 Mechanismus dějů při ozáření. (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)

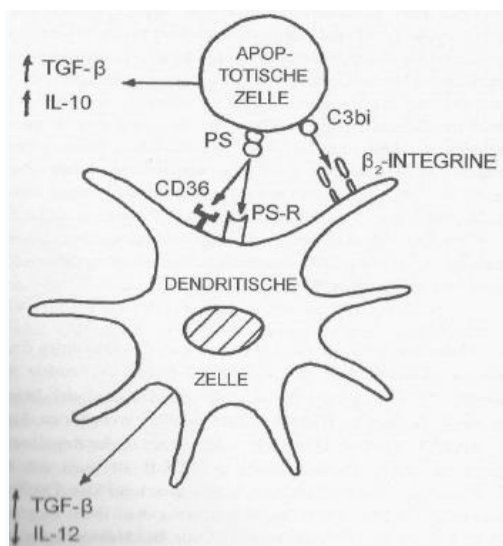


Obr.5 Poškození DNA vlivem radiace přímo (nahore) nepřímo vlivem uvolněných radikálů (dole) (www.sweb.cz/AstroNuklFyzika)

2.5 Apoptóza

je jeden z hlavních typů programované buněčné smrti, probíhající především u živočichů, ale v určitém slova smyslu i u rostlin a dalších skupin. Zahrnuje sled biochemických procesů vedoucích k typickým měnám vzhledu buňky (degradace cytoskeletu a následná změna tvaru cytoplazmatické membrány, smrštění buňky, fragmentace jádra i chromozomů uvnitř. Následně dochází k šetrnému odstranění zbytků této buňky (a nikoliv k zánětu), čímž se apoptóza v základech liší od nekrózy. Mezi nekrózou a apoptózou však není ostrá hranice a často se tyto jevy kombinují, čímž dochází k nejednoznačně pojmenovatelným typům buněčné smrti. Apoptózu lze v mnohých případech vnímat jako pozitivní proces, ke kterému například lidské tělo sahá v průběhu svého vývoje. Apoptoticky však umírají i různé poškozené buňky, a to buď na základě „vlastního rozhodnutí“ samotné buňky (vnitřní cesta), nebo díky buňkám imunitního systému. A právě tento mechanismus je spuštěn v poškozených buňkách při kontaktu s alfa zářením, které je emitováno radonem.

(www.wikipedia.cz)



Obr. 6 Pochody v buňce po ozáření (Deetjen et al,(2005))

2.6. Biologický dopad na organismy vystavené velkým dávkám radiace

Pro dávky mnohonásobně zvýšené, než je v přírodě možno sledovat, dochází k velmi negativním účinkům na organismus. Míra poškození se pak dá lineárně odhadnout, jedná se tedy o účinky deterministické, kdy dojde k překročení určité prahové hodnoty, kdy reparační mechanismy již nejsou schopny defekty na buněčné úrovni spolehlivě odstranit.

- Dávka, která není smrtelná 100 REM a méně (65 RAD a méně), žádný účinek, nebo mírné potíže krevního oběhu
- Rozsah 100-200 REM (65-130 RAD) ještě nepatří mezi dávky smrtelné- měsíčně trvající třas, horečky, bolesti hlavy, potíže dýchání, bolesti v krku, celkové zhoršení zdravotního stavu. Zrudnutí sliznic, otoky mandlí, krvácení dásní, krev v moči (hematurie), vlásenčnicové krvácení kůže. Druhotné infekce. Kompletní zotavení do 6 měsíců.
- Středně smrtelná dávka 400-500 REM (270-300RAD) - týdny horečky a oteklý krk. Zánět hltanu s tvorbami vředů, krvácení dásní a ztráta zubů. Nucení ke zvracení a zvracení první den pro dávku nad 300 REM (ztráta vlasů a chlupů). Úplná epilace nad 600 REM. Krvácení kůže a úst. Krev ve stolici. Úbytek krevních destiček a kostní dřeně. Celkové oslabení a otupělost. Občasná dezorientace. Průjmy, četné břišní bolesti. Šok a kóma. Smrt za 24-40 dní v polovině případů. Pomalé zotavování zbylé poloviny případů

- Středně smrtelná dávka 1000-10 000 REM (670-8700 RAD)- průjmy, vysoké horečky díky enormnímu úbytku krvinek a krevních destiček. Extrémní vyčerpání s šokem a cyanóza (zmodrání kůže díky špatnému okysličování krve). Smrt za 5-30 dní.
- Akutní vliv na CNS 10 000 REM a více (nad 8700 RAD), duševní neschopnost čehokoli, rychlá ztráta vědomí a smrt (upraveno dle) www.21.stoleti.cz)
- **REM** (Rentgen Ekvivalent Člověka-Roentgen Ekvivalent Man) je jednotka vztahující se k dávce jakéhokoli typu záření s biologickým efektem této dávky. Pro vztah této dávky je nutné tuto hodnotu vynásobit kvalitativním faktorem dávky v RAD, která potom vyjádří hodnotu v REM. Pro gama a beta částice vystavení záření 1RAD znamená dávku 1 REM

Mezinárodní soustava jednotek (SI) používá místo REM a RAD jednotku **sievert** (Sv, jednotka dávkového ekvivalentu) a gray (Gy). Tyto jednotky jsou v následujícím vztahu: 1 Sv = 100 REM, 1 mSv = 100 mREM, 1 Gy = 100 RAD (www.21.stoleti.cz)

3. Radonová balneologie

Radonová balneologie se v praxi opírá o teorii radiační hormeze a jejích pozitivních účinků.

Medicínské využití radonu je založeno na skutečnosti, že převážná většina jeho izotopů fungují jako alfa-zářiče s poměrně krátkým poločasem rozpadu (nejznámější izotop ^{222}Rn má poločas rozpadu 3,82 dne, další izotopy už jen: ^{220}Rn 54,5 s a ^{219}Rn 3,92 s). Používají se proto někdy pro krátkodobé lokální ozařování vybraných tkání.

Radonová voda se používá například v jáchymovských lázních, kam je dopravována potrubím z bývalého uranového dolu Svornost, kde jejím nejmohutnějším zdrojem je podzemní pramen, pojmenovaný po akademiku Běhounkovi, objevený v roce 1962, který se objemovou aktivitou přibližně 9-10 kBq/l řadí mezi velmi silné radonové vody (tj. více než 4 kBq/l). Pramen Agricola (navrtaný v roce 2000) má měrnou aktivitu ještě přibližně dvakrát tak větší, ale jeho vydatnost je menší. Vydatnost všech Jáchymovských radioaktivních pramenů činí řádově 500 m³/den. V Jáchymovských lázních se potom používají koupele, ve kterých aktivita radonové vody poklesla (v důsledku odvětrání a rozpadu během postupného přečerpávání) na 4,5 kBq/l. (www.wikipedia.cz); (www.laznejachymov.cz)

3.1 Způsob aplikace radonové balneoterapie

Radonovou terapii je možno provádět třemi způsoby:

3.1.1 Radioaktivní koupele

Radon je přijímán pokožkou při koupelích v radonové vodě, nebo při vzdušných koupelích v atmosféře obohacené radonem. Radon proniká jednotlivými vrstvami pokožky na principu fyzikální difuze a je resorbován kapilární sítí do krevního oběhu. Do jednotlivých tkání je radon dočasně akumulován na principu specifické propustnosti tkání: rozdělovací koeficienty difuzní rovnováhy jsou 0,43 pro vzduch/krev, 11,2 pro krev/tuk, 0,66 pro krev/ledviny, 0,71 pro krev/játra a 0,36 pro krev/kosti. Eliminace radonu z těla probíhá nejvíce plicemi a zpětnou difuzí přes kůži po ukončení koupele. Jen 0,2 % resorbovaného množství plynu se v těle rozpadá na další dceřiné produkty. Biologický poločas rozpadu je 20-30 minut. Typická délka pobytu pacienta ve vaně s radonovou vodou je dvacet minut. Bez povšimnutí není fakt, že se v zahraničí začal opět používat radioaktivní klystýr. (Draská, 2007)

3.1.2 Radonová inhalace

Vzduch s obsahem radonu je vstřebáván dýchacími cestami v alveolární oblasti do plic. Tam plyn přestupuje do kapilární krve. Inhalační terapie se provádí ve dvou formách: Inhalace vzduchu s radonem a jeho rozpadovými produkty po dobu jedné až několika hodin ve starých důlních šachtách. Druhá metoda je inhalace aerosolu z radonové vody přes inhalační rozprašovací masky nebo ve speciálních inhalatoriích. Tyto zařízení se nachází ještě v Rusku, v Polsku, či v rakouském Bad Gasteinu. (Draská, 2007)

3.1.3 Pitná kúra (ingesce)

Radonová voda je aplikována perorálně a v trávicím traktu se radon resorbuje v souladu s fyzikálními principy do krevního oběhu. Používá se po jídle, při plném žaludku po malých doušcích během půl hodiny. Radon, který proudí do těla, je rychle vylučován plicemi a tím ztrácí své účinné schopnosti. V moderních lázních se od této metody upouští. (Draská, 2007)

3.2 Nemoci léčené radonem

Nemoci pohybového aparátu (artritidy, artrózy kloubů a páteře), stavy po úrazech a operacích
Nemoci periferního nervového systému (neuritida, neuralgie, polyneuropatie)
Kloubní komplikace při metabolických chorobách (diabetické a dnové artropatie)
Vertebrogenní algický syndrom (degenerativní změny obratlů nebo funkčních poruch, diskopatie, kořenové syndromy (Šimek, 2001)

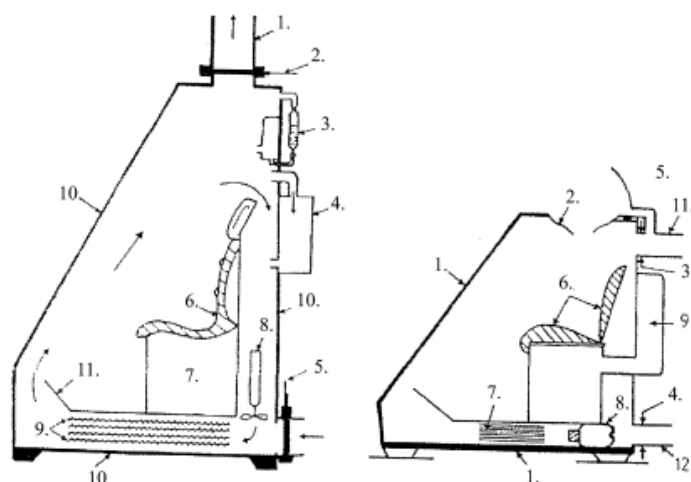
Nemoci dýchacího ústrojí (astma, chronická bronchitida) (Deetjen et al. 2005)

Alergie

Gynekologické problémy (neplodnost, klimakterium) (Becker, 2004)

Radonová terapie se nedoporučuje lidem, kteří mají tumory v aktivní fázi, akutní TBC, těžkou srdeční slabost, akutní a subakutní psychogenní onemocnění, dále není vhodná pro těhotné ženy (pro ně není vůbec vhodná žádná lázeňská léčba, v případě jiných léčeb je nutná konzultace s lékařem), omezená pro děti a dospívající, pro pacienty s hyperfunkcí štítné žlázy a pacienty po léčbě nádorových onemocnění v období do 2 let (Šimek, 2001). Na obrázku 7. (Becker, 2004) jsou zobrazené radonové boxy, které byly používány v Rusku. V první kabině byl léčený člověk uzavřen a radon inhaloval a v druhé kabině se konala tzv. vzdušná lázeň, radon se dostával kůží do organismu, přitom člověk radon neinhaloval, jeho hlava byla izolována nepropustným límcem. Hodnoty dávek, absorbované při této kůře lze nalézt v tabulce 3. (Deetjen et al, 2005).

Boxes used in Russia for application (and research) of radon gas treatment including inhalation (left), and for exposure of the body skin only (right), including (left) the radon gas production (3), air heating devices (10 left, 7 right), radon control chamber (left 4), etc



Obr. 7 Boxy, používané v Rusku při léčbě radonem (vlevo inhalace, v pravo ozáření radonem – vzdušná lázeň) (Becker, 2004)

3.3 Nejvýznamnější fyziologické reakce při radonové kůře

- Zvýšení reparační buněčné kapacity- např. buňky vystavené malým dávkám záření vykazují následně větší odolnost vůči dávkám vyšším, analogicky i jiným noxám (podobný princip jako u očkování)
- Zvýšená sekrece endorfinů a endogenního kortisolu s následným analgetickým a antiflogistickými efekty

- Příznivé ovlivnění buněčné i humorální imunitní situace u autoimunních chorob pohybového aparátu
- Stimulace antioxidantů a dalších enzymů v organismu, což ovlivňuje pozitivně proces stárnutí buněk
- Průvodní zvýšená diuréza a hyperhidróza napomáhající exkreci katabolických odpadů

4. Model stanovení dávek při aplikaci radonu

Působením radiačních vlivů na organismus a stanovením dávek radiace a počítání eventuálního rizika z ozáření se zabývá **dozimetrie**

4.1 Dozimetrické veličiny

Míra biologických účinků záření na látku je úměrná koncentraci iontů vzniklých v daném objemu látky. A tato koncentrace iontů je zase úměrná energii záření, která se v daném objemu látky absorbovala. Základní dozimetrickou veličinou, která charakterizuje fyzikálně-chemické a posléze i biologické účinky záření na látku, je **absorbovaná radiační dávka**:

- **Absorbovaná dávka D**

je energie ionizujícího záření absorbovaná v daném místě ozařované látky na jednotku hmotnosti. Je dána poměrem

- $D = \Delta E / \Delta m$,

kde ΔE je střední energie ionizujícího záření absorbovaná objemovým elementem látky a Δm je hmotnost tohoto objemového elementu. Jednotkou absorbované dávky je 1 J / 1kg, která se nazývá 1 **Gray** [Gy] (dílčí jednotky pak 1 mGy = 10^{-3} Gy a 1 μ Gy = 10^{-6} Gy).

Starší jednotkou radiační dávky (v soustavě CGS) byl 1 **rad** = 10^{-2} Gy.

- **Dávkový příkon D'**

je dávka obdržena v daném místě ozařovanou látkou za jednotku času, tedy poměr přírůstku dávky ΔD za časový interval Δt :

$$D' = \Delta D / \Delta t .$$

Jednotka je Gray za sekundu [Gy.s⁻¹]

Při hodnocení účinku nepřímo ionizujícího záření na látku se můžeme ještě setkat s veličinami *expozice* a *kerma*, zvláště ve starší literatuře.

Jelikož biologická účinnost různých druhů záření se může značně lišit (v závislosti právě na hustotě ionizace), zavádí se pro každý druh záření tzv. **jakostní faktor** Q (nazývaný též "radiační váhový faktor" w_R nebo "relativní biologická účinnost"), který udává, kolikrát je daný druh záření biologicky účinnější než záření fotonové - X nebo gama (za základ se bere rentgenové záření o energii 200keV).

Dávkový ekvivalent (ekvivalentní dávka) H .

bere ohled na skutečnost, že některé druhy ionizujícího záření jsou více nebezpečné než jiné. V uvažované tkáni je dán součinem absorbované dávky D v daném místě a jakostního faktoru Q :

$$H = Q \cdot D$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je 1 **Sievert** [Sv]. Dávka 1 Sv jakéhokoli záření má stejné biologické účinky jako dávka 1 Gy rentgenového nebo gama záření. Energetickým neutronům se např. připisuje jakostní faktor deseti. Záření alfa má jakostní faktor rovný dvaceti. Tento jakostní faktor je pouhým přiblížením, naše poznatky o radiačních účincích nejsou úplné.

Efektivní dávka H_E - součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v tkáních či orgánech lidského těla:

$$H_E = \sum w_T \cdot H_T,$$

kde H_T je ekvivalentní dávka v dané tkáni T , w_T je tkáňový váhový faktor. Sčítá se přes všechny uvažované tkáně T .

Tkáňový (orgánový) váhový faktor w_T vyjadřuje relativní příspěvek daného orgánu nebo tkáně T k celkové zdravotní újmě způsobené rovnoměrným ozářením těla; je normován tak, aby se součet všech váhových faktorů rovnal 1 ($\sum w_T = 1$). Hodnoty tkáňových váhových faktorů jsou uvedeny v příslušných tabulkách.

Efektivní dávka H_E se tedy vypočte pomocí příspěvků ekvivalentních orgánových dávek H_T všech jednotlivých ozářených tkání: při sčítání se každá orgánová ekvivalentní dávka H_T vynásobí svým tkáňovým váhovým faktorem w_T , který vyjadřuje příspěvek poškození právě toho konkrétního orgánu nebo tkáně k poškození celého těla, vyvolaného účinky rovnoměrného celotělového ozáření. Pomocí efektivní dávky H_E lze tak převést účinky ozáření jakékoli tkáně, orgánu nebo části těla na srovnatelné účinky, vzniklé rovnoměrným

ozářením celého těla. Výhodou efektivní dávky je, že umožňuje vyjádřit radiační zátěž jediným číslem (jednotkou je samozřejmě zase Sv) i při nerovnoměrném ozáření, či ozáření jen určitých orgánů, jako kdyby se jednalo o radiační zátěž při rovnoměrném ozáření. Pro posouzení dlouhodobých účinků záření z vnitřní kontaminace radioaktivní látkou – radiotoxicity - se dále zavádí tzv. dávkový úvazek, což je absorbovaná dávka ionizujícího záření, kterou způsobí v určitém orgánu nebo tkáni daná radioaktivní látka za dobu 50 let od jejího příjmu do organismu (upraveno dle(www.sweb.cz/AstroNuklFyzika))

4.2 Dávky při aplikaci

Dávky ozáření na určité orgány se liší v závislosti na typu konzumace radonu. Máme již zmiňované tři cesty radonu do organismu:

- přes kůži (koupele)
- konzumace (ingesce)
- vdechování (inhalace)

Při koupeli, která trvá 15 minut, se dávky pohybují pro pokožku 0,1mSv, pro ledviny 0,003 mSv a pro tělesný tuk kolem 0,0015mSv. Dvě hodiny po koupeli zůstane v těle pouze kolem 10% radonu. Roční dávka pacienta při léčbě činí 0,1-3mSv, 1mSv při inhalaci a 0,1 mSv pro žaludek při konzumaci radonové vody. (Becker, 2004) Je nutno podotknout, že se jedná o dávky malé, takže riziko nemoci z ozáření je minimální. Při aplikaci radonu je možné spočítat absorbovanou dávku pro různé tkáně. Model výpočtu se řídí těmito zákonitostmi:

4.2.1 Matematický vztah pro výpočet dávky formou pitné kúry (konzumace):

Specifická energie SE (radionuklidový specifický koeficient)

$$SE(T \leftarrow S; t) = 1/(M_t(t)) \sum Y_i E_i A F_i(T \leftarrow S; t)$$

Kde :

SE je specifická energie, **S** je zdrojová oblast, **T** je cílová oblast, **i** je typ radiace, **Y** je výnos radiace typu **i**, **E_i** je průměrná energie radiačního typu **i**, **AF_i** je absorbovaná frakce energie (emitována zdrojovou oblastí **S** a absorbována cílovou oblastí **T**); **M_t** je hmotnost cílové oblasti **T**; **t** je čas

Absorbovaná dávka D_t

$$D_t(t, t_0) = c \sum_s \sum_j q_{s,j}(t) SE(T \leftarrow S; t)$$

Kde:

q_{s,j} (t) je aktivita radionuklidů **j**, ze zdrojového regionu **S**, v čase **t**

$SE(T \leftarrow S; t)$ je specifická energie, ukládaná do cílové oblasti T, v čase t

c je konstanta, požadovaná jednotkami q a SE

Absorbovaná dávka je sumou poměrů absorbovaných dávek.

Ekvivalentní dávka H představuje různé druhy absorbované radiace, přímo úměrné jakostnímu faktoru.

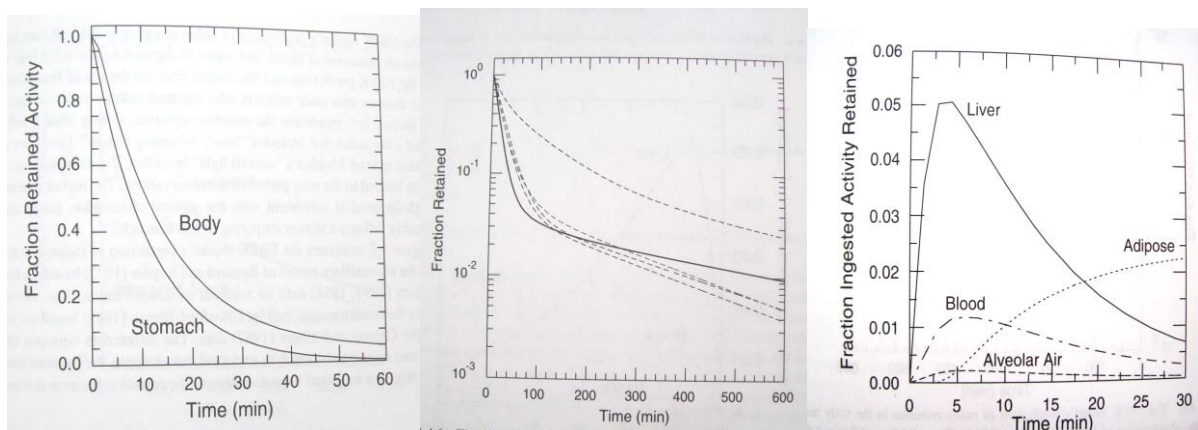
Ekvivalentní dávka H

$$H = D_{\text{Low LET}} + 20 D_{\text{high LET}}$$

Kde:

$D_{\text{Low LET}}$ a $D_{\text{high LET}}$ jsou absorbované dávky elektronů a fotonů nízké lineární přenosové energie (LET – linear energy transfer) a alfa částice vysoké lineární přenosové energie (LET) (National Research Council, 1999)

Při pitných kůrách dochází k velice rychlému úniku radonu z těla. Radon se dostává ven plícemi. Doba setrvání radonu v lidském těle je proto relativně krátká, tudíž absorbovaná dávka je velmi malá. Riziko vzniku nemoci z ozáření je proto nevýznamné. Na obrázku 8. (National Research Council, 1999) jsou patrné různě dlouhé doby setrvání radonu v těle v závislosti na typu tkáně, či orgánu. Pro orgány břišní dutiny je již aktivita radonu hodinu po konzumaci blízká nule, přitom usazení dceřiných produktů v těle je minimální.



Obr 8. setrvání radonu v těle (National Research Council, 1999)

4.2.2 Inhalace:

Při léčebných kúrách dochází ke krátkodobé expozici těla s radonem, proto tyto kúry také nepředstavují velké riziko. O riziku se dá hovořit při dlouhodobé expozici těla s radonem a jeho dceřinými produkty, které se v plicích usazují a působí karcinogenně. Tento jev je především pozorován u horníků při těžbě radonových rud. Tito horníci byli po léta vystaveni extrémním dávkám radonu, proto je u nich patrná indikace plicních tumorů. Radon se z těla nemohl dostávat, protože prachové částice uranových rud uvízly v alveolárním systému a kontinuálně vyzařovaly do plicní tkáně. Podle NCI modelu (national cancer institut) lze stanovit radonové riziko pro plíce horníků při těžbě uranových rud

- *Model TSE/AGE/WL* (čas před vystavením, věk a koncentrace)

$$RR = 1 + \beta (w_{5-14} + \theta_2 w_{15-24} + \theta_3 w_{25}) \Phi_{age} \gamma_{wl};$$

kde **RR** je relativní riziko (5-15 let před koncem těžby...)

- *Model TSE/AGE/DUR* (čas před vystavením, věk, doba trvání)

$$RR = 1 + \beta (w_{5-14} + \theta_2 w_{15-24} + \theta_3 w_{25}) \Phi_{age} \gamma_{DUR};$$

(National Research Council (1999))

Pro stanovení dávky při inhalaci je také možné použít tento kalkulátor: <http://www.wise-uranium.org/rdcern.html>

Ovšem výsledky těchto modelů mají dvojí interpretaci. Dle ryze lineárního modelu bude stanoveno riziko rakoviny, ovšem bude opominut pozitivní efekt léčby. Dle alternativní teorie bude stanovena dávka stejná, jako v případě odpůrců radioaktivity, ovšem výsledný efekt bude pozitivní, což dokládají mnohé studie, protože i podle lineárních modelů se riziko pohybuje v rámci promilí. V tabulce 2 a 3 (převzato z Deetjen et al, 2005) jsou vypočítány různé dávky při odlišných metodách aplikace pro různé tkáně.

Tabulka 2. Roční efektivní dávky osob při různých aplikačních formách radonu ^{222}Rn v radonové balneoterapii (převzato z Deetjen et al. 2005)

Forma aplikace	Efektivní dávka (mSv)
Koupeľ <i>Sibyllenbad</i> (800+- 380 Bq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu v místnosti ; Příjem: Roční doba pobytu v místnosti s lázní 2000h) (Příjem: roční doba pobytu: 400h při 450 Bq/m ³) (v lázni s oxidem uhličitým: 260Bq na m ³ ve vzduchu v místnosti s lázní)	Max. 2,5 0,25 Asi 0,2
Inhalace <i>(Gasteinská termální štola)</i> (44 kBq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu ve štole Radonová terapie v lázni <i>Schlema</i> (500Bq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu v místnosti)	15 8(lékaři) 1,5

Tabulka 3. Porovnání dávek pro plíce a kůže při různých druzích aplikace (Upraveno dle Deetjen et al. 2005)

Forma aplikace	Ekvivalentní dávka (mSv)		Efektivní dávka (mSv)
	plíce	kůže	
Koupeľ 10x20 min v termální lázni <i>Gastein</i> (662 bq/l ^{222}Rn ve vodě) 10x20 min V termální lázni <i>Schlema</i> (1550Bq/l ^{222}Rn ve vodě)	0,05 0,10	20 50	0,2 0,5
Inhalace 12x1 h V termální štole <i>Gastein</i> (44kBq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu ve štole)	10 -	10 -	1,5 1,8
Vzdušná koupel 15x15 min <i>Gastein</i> (1480 kBq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu) <i>Gastein</i> (140 kBq/m ³ ^{222}Rn ve vzduchu)	0,001 0,0001	40 4	0,4 0,05

Diskuse

Radioaktivní léčba byla v první polovině dvacátého století velmi populární. Byly budovány četné inhalatoria, lázně, dokonce bylo možné připravit si radioaktivní vodu v klidu domova přístrojem zvaným *kapesní Jáchymov*. (jednalo se o nádobu s radiovou solí, která produkovala radioaktivní vodu).

V druhé polovině 20. století se postoj k radioaktivitě obrátil a bylo jí prisouzeno i to, za co nemohla. Je tento postoj správný? Není lepší znovu posoudit klady a zápory radonové léčby? Pro objektivní posouzení ovšem nelze být slepým zastáncem jedné teorie. Je nutné brát oba názory v potaz a řídit se podloženými fakty. Benefit radonové léčby je obrovský hlavně proto, že jsou patrné pozitivní účinky, přitom dávka ozáření je malá, tudíž je malé i riziko. Škodlivost malých dávek radiace je neprokázaná, proto považuji tyto terapie za zcela bezpečné, ve srovnání s léčbou např. antirevmatiky, u kterých lze doložit nežádoucí účinky, dokonce úmrtní pacientů.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zhodnocení vlivu radonu na lidské tělo. Byly zde diskutovány různé postoje k této problematice. Prvním je fyzikální přístup s aplikací lineární bezprahové teorie (LNT), který je stále používán regulačními orgány. Ve vědecké obci je však nezanedbatelná číst odborníků přesvědčena o opaku, kdy jsou vyzdvihnuty terapeutické metody léčby, které nám radon přináší a dávky, které se při léčbě do organismu dostávají. I při aplikaci lineární bezprahové teorii a výpočtu relativního rizika je jasné, že jde pouze o „riziko“ virtuální, tj. o několik řádů menší, než mají některé obecně tolerované jiné činnosti (např. kouření, automobilismus apod.).

Zjištěním, že dávky jsou malé lze konstatovat velkou prospěšnost radonové léčby. Porovnáním kladů a záporů radonové léčby dojdeme k závěru, že se jedná o léčbu s dobrými výsledky, přitom popisované i hypoteticky možné (podle LNT) nežádoucí účinky jsou minimální.

Proto se domnívám, že by se měla tato metoda více uplatňovat. Toho je možné docílit dalším studiem dané problematiky, objevovat nové metody využití, vyhledávat nové zdroje použitelné pro radioaktivní léčbu a překonat a vyvrátit po léta zakořeněný radiofobický mýtus. Ovšem je třeba mít na paměti, že je radioaktivita dobrý sluha, ale zlý pán.

Seznam použité literatury:

Becker K (2004): One century of radon therapy. *Int. J. Low Radiation* 1, 3. pp 334-357.

Calabrese E. J., Baldwin L. A.,(2003): Toxicology rethinks its central belief; *Nature* 421. pp 691 – 692.

Luckey T.D.(2000): Radiobiology deceptions reject health. In: Proceedings of 8th International conference of nuclear engineering. Baltimore, USA. pp 1 – 11.

Deetjen P., Falkenbach A., Harder D., Jockel H. Kaul a.. von Philipsborn H.(2005): Radon als Heilmittel. Kovač Verlag, Hamburg. 111 p.

Šimek J. (2001) Jáchymovské radonové koupele. *Lékařské listy*, příloha Zdravotnických novin č.42

Draská L. (2007): Ovlivnění bolestí pohybového aparátu metodami Jáchymovské balneoterapie. *Bolest* 1, pp 19 – 22.

National Research Council (1999): Risk assesment of radon in drinking water. National Academy Press, Washington. 279 p.

Internetové zdroje:

www.wikipedia.cz

www.laznejachymov.cz

www.wise-uranium.org/rdcrn.html

www.sweb.cz/AstroNuklFyzika

www.21.stoleti.cz

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, s použitím uvedené literatury.

V Praze dne : 28. května 2009

Jan Šimon

.....